



Transport de neige par le vent sur un site de haute montagne : de la modélisation à l'observation, de l'observation à la modélisation

F. Naaim-Bouvet, G. Guyomarc, M. Naaim, Y. Durand, H. Bellot, P. Pugliese

► To cite this version:

F. Naaim-Bouvet, G. Guyomarc, M. Naaim, Y. Durand, H. Bellot, et al.. Transport de neige par le vent sur un site de haute montagne : de la modélisation à l'observation, de l'observation à la modélisation. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2012, 2012 (1), p. 51 - p. 57. 10.1051/lhb/2012008 . hal-00690355

HAL Id: hal-00690355

<https://hal.science/hal-00690355>

Submitted on 23 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Transport de neige par le vent sur un site de haute montagne : de la modélisation à l'observation, de l'observation à la modélisation

Florence NAAIM-BOUVET¹, Gilbert GUYOMARC'H², Mohamed NAAIM¹, Yves DURAND²,
Hervé BELLOT¹, Philippe PUGLIESE²

¹ IRSTEA, UR ETGR, Unité de Recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanche, 2 rue de la papeterie BP 76 38402 Saint-Martin d'Hères: florence.naaim@irstea.fr; mohamed.naaim@irstea.fr; herve.bellot@irstea.fr

² Organisme GAME/CNRM – CNRS/Météo-France Domaine Universitaire 1441 rue de la piscine 38406 Saint-Martin d'Hères : gilbert.guyomarch@meteo.fr; yves.durand@meteo.fr; philippe.pugliese@meteo.fr

RÉSUMÉ. – Depuis 20 ans le Cemagref (UR ETNA) et Météo France (Centre d'Etude de la Neige) se sont associés pour étudier le transport de la neige par le vent in situ, au Col du Lac Blanc (Alpe d'Huez) à 2700 m d'altitude. Dans un premier temps, le site a été essentiellement équipé de centrales météorologiques classiques et d'un réseau de perches à neige, le but étant de tester les modèles numériques de transport de neige par le vent SYTRON (CEN) et NEMO (Cemagref). Ces modèles, dont les principes physiques sont présentés dans cet article, sont complémentaires en termes d'échelle spatiale et temporelle : à terme les sorties du modèle SYTRON (maille de 45 m, pas de temps horaire) pourront constituer les entrées du modèle NEMO (maille de 1 m, pas de temps de 10 minutes). Puis de nouveaux instruments et technologies (capteurs acoustiques et optiques de transport de neige, anémométrie ultrasonique, prélèvement d'échantillons de neige dans de l'isooctane, restitution de l'albédo à partir de photographies, laser-scan terrestre) sont apparus et ont pu être testés sur le site. L'ensemble de ces mesures a permis d'acquérir de nouvelles connaissances telles les seuils de vent à l'origine de l'érosion de la neige associés à chaque type de particule, les profils de flux de neige transportée et paramètres associés (vitesse de chute des particules, nombre de Schmidt), la distribution granulométrique de la neige transportée, la modification de la longueur de rugosité en présence de particules, les coefficients de rafales,... Ces nouvelles connaissances peuvent désormais être incluses dans la physique des modèles contribuant de la sorte à leur amélioration. Les observations initiales quant à elles sont poursuivies et font du site du Col du Lac Blanc une référence climatologique à 2700 m depuis 20 ans.

Mots clés : Neige, vent, transport de neige par le vent, modèle numérique, observations in situ, processus physiques, mesures, capteurs, Alpes, climatologie

Blowing and drifting snow over a mountainous instrumented site : from modeling to observation, from observation to modeling

ABSTRACT. – For 20 years Cemagref (UR ETNA) and Météo France (Centre for the Study of Snow) have joined together in studying drifting snow at Col du Lac Blanc (Alpe d'Huez) 2700 m. Initially, the site was mainly equipped with conventional meteorological stations and a network of snow poles, in order to test numerical models of drifting snow Sytron (CEN) and NEMO (Cemagref). These models, which physical principles are presented in this paper, are complementary in terms of spatial and temporal scales: outputs of Sytron model (45 m mesh, time step: 1 hour) will form the inputs of NEMO model (mesh: 1 m, time step: 10 minutes). Then new sensors and technologies (acoustic and optical drifting snow sensors, ultrasonic anemometer, snow sampling in isooctane, estimation of albedo from photographs, terrestrial laser-scan) appeared and have been tested on the site. All these measurements allow to develop new knowledge dealing with thresholds velocity according to a type of snow particle, snow flux profiles including parameters such as fall velocity and Schmidt number, histograms of particle widths, aerodynamic roughness, gust factors. But we carry on initial observations. In such way, the Lac Blanc pass is also a climatological reference for 20 years at 2700 m.

Key words: Snow, wind, drifting snow, numerical model, in situ observations, physical processes, measurement, sensor, Alps, climatology

I. INTRODUCTION

Le transport de la neige par le vent pose de nombreux problèmes que ce soit dans un contexte plateau avec la formation de congères (viabilité hivernale, enfouissement de bâtiments) ou dans un contexte de haute montagne avec des phénomènes de redistribution et la formation de corniches et de plaques à vent (avalanches) qui contribuent à augmenter de façon sensible le risque de déclenchement accidentel d'avalanches

de plaques. Depuis une vingtaine d'années, l'Unité de Recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanches du Cemagref et le Centre d'Etudes de la Neige (Météo-France) ont sélectionné un site de haute altitude (Col du Lac Blanc - 2 700 m - Grandes Rousses) pour réaliser des mesures dédiées à l'étude du transport éolien de la neige. Divers instruments de mesures, parfois des prototypes ou encore des capteurs détournés de leur utilisation initiale, ont pu être testés et ont permis d'acquérir des séries de données uniques.

II. LE SITE DU COL DU LAC BLANC 1990-2000 : DE LA MODELISATION A L'OBSERVATION

II.1. Description du site, premiers équipements et étude

Le site du Col du Lac Blanc (figure 1) situé dans le massif des Grande Rousse à 2700 m d'altitude, se trouve à proximité du domaine skiable de l'Alpe d'Huez et est exploité depuis vingt ans pour l'étude du transport de neige par le vent conjointement par le Cemagref et Météo France. Une des caractéristiques principales et par la même un atout du col, est d'avoir des vents dominants orientés à plus de 80% sur un axe nord sud. En effet, sa situation géographique entre le Dôme des Petites Rousses et la chaîne principale des Grandes Rousses limite l'effet des vents entrants d'orientations différentes. Ce site se comporte donc comme une soufflerie naturelle [Naaïm-Bouvet F., 2000]. Le site du Lac Blanc est équipé d'un ensemble de trois stations automatiques pérennes (figure 2) ; deux sont situées de part et d'autre du Col du Lac Blanc (expositions Nord et Sud) tandis que la troisième est sur un point surplombant voisin (Dôme des Petites Rousses – 2800 m) afin d'obtenir une



Figure 1 : Le Col du Lac Blanc avec en arrière plan le Dôme des Petites Rousses.



Figure 2 : Station météorologique avec en arrière plan le réseau de perches à neige.

mesure plus indépendante des effets de couche limite. Les principaux paramètres, mesurés en continu au pas de temps de 15 minutes depuis environ 20 ans durant la saison hivernale sont : la hauteur de neige, la température de l'air, la vitesse et la direction du vent et l'équivalent en eau des précipitations à 10 m au dessus du sol nu. Ces mesures standards ont également été complétées par 6 capteurs acoustiques de transport de neige mis au point au Cemagref puis commercialisés par la société AUTEG. Chaque capteur consiste en un micro mis en place dans un tube aluminium de 2 m de long installé verticalement au niveau du sol. Le bruit généré par les particules impactant le tube lors d'un épisode de transport est enregistré.

Les premiers essais de calibration ne s'étant pas montrés concluant, le capteur a simplement permis de déterminer si oui ou non un épisode de transport s'était produit. A ces mesures météorologiques automatiques s'ajoutent des campagnes de mesures manuelles du manteau neigeux (sondage stratigraphique, relevés de profil de perches sur environ 500 m, dépouillement de photos de caméra automatique, profils de flux de neige transportés mesurés dans des « filets » à papillon).

Toutes ces mesures permettent aussi de faire des analyses manuelles de situations de transport et de leurs effets [Guyomarc'h G., 2010]. Pour ce qui est de l'étude des processus physiques, un des apports significatifs des données issues du Col du Lac Blanc a été la détermination de la vitesse d'arrachement seuil des différents types de neige [Guyomarc'h G., 1998], [Merindol L., 2000]. Ainsi un indice d'occurrence de transport basé sur l'intensité du vent de surface et les caractéristiques des grains de neige au sol, a pu être établi (figure 3).

Mais initialement les dispositifs expérimentaux avaient plus été conçus pour permettre une validation des modèles numériques développés par le Cemagref (NEMO) et par Météo France (SYTRON). Les modèles développés par les deux laboratoires sont complémentaires et permettent de modéliser le phénomène à des échelles différentes.

II.2. NEMO

Le modèle numérique développé au Cemagref sous le nom de NEMO [Naaïm M., 1998] est un modèle eulérien multiphasique basé sur la mécanique des milieux continus incluant une description des processus physiques de la couche de saltation et de diffusion. Sa maille est de l'ordre du mètre (ou moins) et son domaine d'application de quelques centaines de mètres (typiquement le couloir d'avalanche ou l'environnement au vent d'une voie de

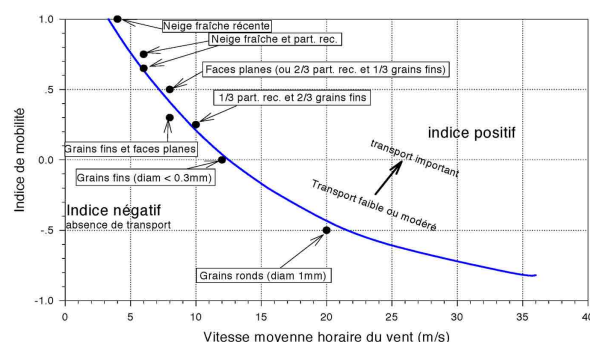


Figure 3 : Indice d'occurrence de transport en fonction du vent (axe x) et de la mobilité potentielle des grains de surface du couvert neigeux (axe y). La mobilité est fonction des grains de surface.

communication ou autour de bâtiments). Le but n'est pas ici de présenter en détail le modèle numérique NEMO mais d'en préciser les principales caractéristiques (figure 4) afin d'introduire les paramètres d'entrée du modèle nécessaires à une simulation. Ce modèle prend en compte l'inertie de l'érosion et du dépôt de la neige. La couche de saltation est décrite par sa hauteur et sa concentration, son équation de conservation de la masse ainsi que par deux vitesses de frottement, l'une pour la phase solide et l'autre pour la phase gazeuse. L'expression de ces deux vitesses prend en compte la concentration en particules. La couche de saltation est considérée comme la limite inférieure de la couche de diffusion turbulente. La couche de diffusion turbulente est décrite par les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement formulées pour la phase solide et la phase gazeuse. L'interaction entre les deux phases est prise en compte par l'intermédiaire de la force de frottement entre les particules et le fluide porteur. La turbulence est modélisée par un modèle de type $k-\epsilon$ dans lequel une réduction de la turbulence avec la concentration en particules est considérée. La diffusion de la phase solide est supérieure à la diffusion de la phase gazeuse ce qui est pris en compte par l'intermédiaire d'un nombre de Schmidt inférieur à 1. L'échange entre la couche de saltation et le manteau neigeux est pris en compte par un modèle de dépôt et d'érosion. Le maillage est adapté à l'évolution temporelle du dépôt.

Le modèle nécessite un jeu de paramètres incluant la vitesse de chute des particules, le nombre de Schmidt, la vitesse seuil d'arrachement des particules, la vitesse de frottement et la rugosité aérodynamique. NEMO a été testé avec succès en comparant des congères obtenues en soufflerie et à saturation pour des particules sèches (sable, sciure,...) au droit d'une barrière à neige en modèle réduit [Naaim M., 1998] (figure 5). Dans ce cas, tous les paramètres d'entrée pouvaient être déterminés et restaient constants au cours du temps. Mais lorsque nous avons comparé les résultats avec des observations sur site au Col du Lac Blanc [Michaux J-L., 2001], les résultats ont été moins concluants. Dans ce cas les entrées du modèle provenaient de données issues des centrales de mesures (vitesse du vent variant toutes les dix minutes et durée effective de l'épisode de transport) et de formulations semi-empiriques (débit maximal dans la couche de saltation, hauteur de saltation, rugosité aérodynamique modifiée par la présence de particules, produit de la vitesse de chute par le nombre de Schmidt) qui n'avaient pas été obtenues dans les Alpes. Certes, le modèle initial n'avait pas été utilisé tel quel du fait du temps de calcul et des hypothèses supplémentaires avaient été faites. Cependant il est vraisemblable qu'une source importante d'incertitudes provenait du manque d'évaluation précise des paramètres d'entrée.

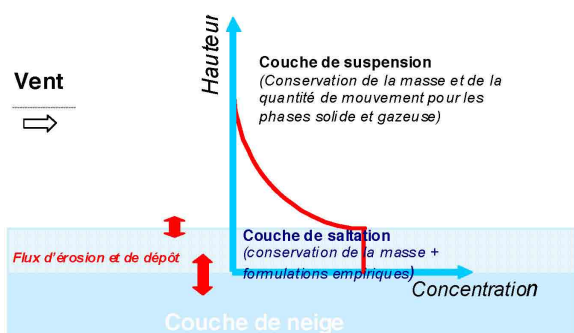


Figure 4 : Principe de la modélisation réalisée dans NEMO.

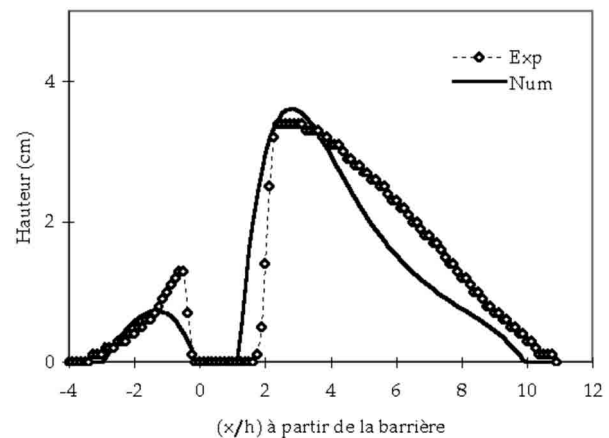


Figure 5 : Comparaison de congères obtenues en soufflerie et numériquement.

II.3. SYTRON 1

La chaîne numérique SCM [Durand Y., 1997] constituée des modules Safran, Crocus et Mepra est un ensemble automatique de simulation du couvert neigeux, de sa stratigraphie et de ses risques potentiels à l'échelle du massif (environ 400 km²) mais à diverses altitudes, expositions et pentes. L'indice d'occurrence de transport (figure 3) calculé automatiquement, est utilisé à la fois opérationnellement par les prévisionnistes de Météo-France mais est aussi intégré dans des modélisations de plus haut niveau afin d'initier des calculs plus complexes de flux de neige transportée (Sytron 1 et 2, cf paragraphes suivants [Gallée H., 2001]). Sytron1 [Durand Y., 2001] est une paramétrisation, en test pré-opérationnel, intégrée à la chaîne SCM [Durand Y., 1999] qui, à l'échelle du massif, vise à simuler les effets du transport de neige sans réellement modéliser les phénomènes sous-jacents à échelle fine. Pratiquement, Sytron 1 enlève une partie du manteau neigeux simulé sur le versant au vent et la redépose sur le versant sous le vent pour toutes les altitudes représentées par SCM (pas de 300 m) pour un même massif (figure 6). Les différentes étapes de l'estimation sont :

- Estimation de la vitesse et de la direction du vent de transport en utilisant Safran et détermination de l'occurrence de transport en utilisant l'indice d'occurrence de transport.
- Détermination de la quantité de neige transportable sur deux versants opposés (reptation + saltation + diffusion turbulente) et perte par sublimation.
- Modification de Crocus pour prendre en compte dynamiquement les perturbations induites par le transport de neige (modification des grains, densification, aggrégation).

III. LE SITE DU COL DU LAC BLANC 2000-2010 : DE L'OBSERVATION À LA MODÉLISATION

Les progrès dans le domaine de l'instrumentation et l'investissement croissant sur le site ont permis sur cette dernière décennie de tester non pas les modèles dans leur ensemble mais blocs par blocs, c'est-à-dire hypothèses par hypothèses. Les processus physiques en jeu ont pu être étudiés plus finement pour pouvoir être à terme mieux pris en compte dans les modèles [Naaim-Bouvet F., 2008]. Cette vision reste bien sur schématique car dans le même temps, l'instrumentation permettait également une estimation des

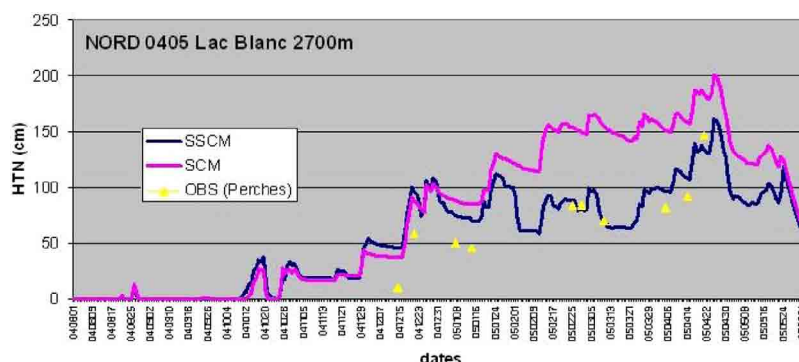


Figure 6 : Hauteurs de neige (saison 2004-2005) modélisées avec utilisation (SSCM) et sans utilisation de Sytron1 (SCM) sur le site du Lac Blanc. Les données sont comparées aux mesures des perches.

paramètres de sortie des modèles (hauteur de neige) avec une résolution spatiale plus grande.

III.1. L'évolution des moyens de mesures et l'amélioration de l'instrumentation au Col du Lac Blanc

III.1.1. Capteurs de transport de neige [Bellot H., 2011]

Un des paramètres clef, dont la mesure est encore soumise à controverse, est le flux de neige transporté. Au col du Lac Blanc des capteurs mécaniques ont tout d'abord été utilisés : il s'agissait de filets exposés au vent capable de retenir la neige transportée tout en restant perméable au flux d'air. Ce dispositif nécessite la présence d'expérimentateurs sur le site ce qui limite et la fréquence d'échantillonnage et la durée des mesures. Cependant, ils restent actuellement utilisés notamment pour calibrer les capteurs automatiques. Un banc de mesures a été mis en place pour tester les différents capteurs sur le marché basés sur des principes acoustiques et optiques. La valeur du flux de neige transporté varie significativement avec la hauteur. Le banc de transport (figure 7) a donc été complété par un capteur de mesure de hauteur de neige SR50.

A la fin des années quatre-vingt dix, une société suisse (IAV Engineering) mettait sur le marché un capteur de transport de neige par le vent portant le nom de Flowcapt, basé sur un principe acoustique, tout comme celui développé par

le Cemagref et AUTEG. Le Flowcapt est constitué de plusieurs tubes disposés verticalement, chaque tube étant équipé d'un microphone capable d'enregistrer le bruit causé par les impacts des grains de neige et de fournir un flux exprimé en $g.m^{-2}.s^{-1}$. A cette fin, les tubes sont étalonnés individuellement de manière industrielle pour des chocs supposés rigides élastiques sous un flux variable de particules cuboïdes de PVC à une vitesse constante de $1 m.s^{-1}$. Des campagnes menées en soufflerie et au Col du Lac Blanc [Cierco F-X., 2007] ont en fait montré que le flux délivré par le capteur dépendait d'une part du type de grain mais surtout de l'inverse la vitesse à la puissance 4, rendant toute calibration assez hasardeuse.

Un autre capteur, d'origine japonaise (SPC-S7, Niigata Electric) a donc été testé. Il est constitué d'un faisceau optique qui est obstrué par le passage des particules. Le diamètre et le nombre des particules de neige transportées sont détectés par leur ombre sur des semi-conducteurs photosensibles. L'amplitude du pic d'atténuation du signal est proportionnelle à la taille de la particule. Ces particules sont classées en 32 tailles discrètes de 50 à 500 μm et le capteur retourne le nombre de particules pour chaque taille toutes les secondes. Les données de flux obtenues par le biais de ce capteur sont en accord avec les mesures issues des filets [Naaim-Bouvet F., 2010]. C'est désormais un profil de 3 Snow Particle Counter qui est utilisé pour mieux comprendre les processus physiques en jeu dans les couches de saltation et de diffusion turbulente. Un des inconvénients majeurs de ce capteur est sa consommation

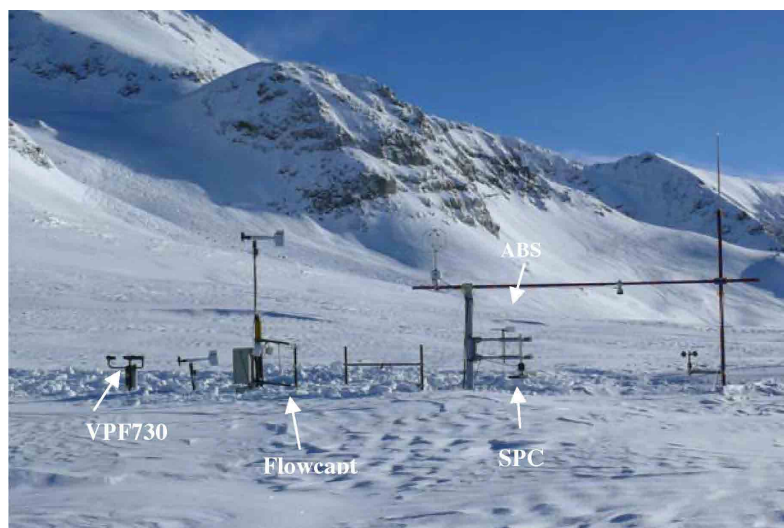


Figure 7 : Banc de transport de neige par le vent.

électrique nécessitant la présence du réseau électrique et la nécessité de disposer d'un PC pour l'enregistrement des données. Un nouveau capteur de transport ABS (Automatic Blowing snow Station) basé lui aussi sur un principe optique mais nécessitant l'utilisation conjointe d'un anémomètre a été développé au Japon. Il ne délivre pas la distribution granulométrique mais uniquement le flux de particules et peut être alimenté par une éolienne avec un enregistrement sur centrale d'acquisition. Dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Nagoya, 2 ABS sont actuellement en test sur le banc de transport du Col du Lac Blanc.

Enfin, un disdromètre BIRAL VPF730 a également été testé sur ce banc [Bellot H., 2001]. Le but de cet essai, mené conjointement avec le LGGE, était ici de tester sa capacité à détecter des épisodes de transport voir à les quantifier afin de pouvoir interpréter des enregistrements passés effectués en Antarctique. Dans ce cas, les particules sont classées en 16 tailles discrètes de 0 à 3200 μm et le capteur retourne également la vitesse des particules sur 16 classes de 0.4 m.s^{-1} à 20 m.s^{-1} . Le capteur n'a pas été conçu pour mesurer des épisodes de transport de neige (concentration importante de fines particules pouvant avoir des vitesses de vent élevées) si bien que lorsque l'on compare les données issues du SPC et du Biral, on constate que le disdromètre voit moins de particules mais que ces dernières sont plus grosses que celles détectées par le SPC.

III.1.2. Anémométrie

Au niveau métrologique, la mesure de la vitesse de vent ne pose pas de problème particulier. C'est simplement l'acquisition de mesures qui a été renforcée au cours de cette deuxième décennie. Une tour de 10 m a été installée afin d'obtenir le profil d'écoulement du vent et d'en extraire la vitesse de frottement et la rugosité. Cette tour est équipée de six anémomètres à coupelle, d'une girouette, de deux capteurs de température ainsi que d'un capteur de hauteur de neige. Le dispositif est complété par un anémomètre ultrasonique permettant d'avoir accès à la vitesse de frottement via un module de turbulence basé sur la méthode « eddy correlation ».

III.1.3. Répartition spatiale de la neige

Un premier suivi de la répartition spatiale de la neige permettant des mesures plus fines que par simple quadrillage par perches à neige a été réalisé par suivi photographique permettant l'estimation de l'albédo. Cette expérimentation [Corripio J.G., 2004] est basée sur la reconnaissance, à partir de photographies terrestres, des variations spatiales de

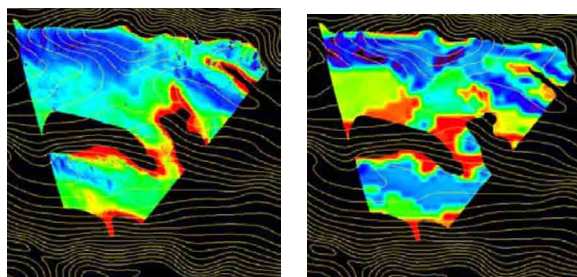


Figure 8 : Albédo déduit des types de grains en surface du manteau neigeux(a) et simulé par Sytron2 (b) pour le 18 février 2003. Les couleurs sont renforcées pour mettre en évidence les différences (en rouge les valeurs les plus élevées). Le nord est à droite avec une image prise depuis le Pic Blanc.

la réflectivité et de la texture de la neige afin de les relier avec les effets du transport éolien de la neige qui modifie les grains de surface et en change donc les caractéristiques radiatives. Cette identification des zones d'érosion et d'accumulation est cruciale pour la validation des modélisations (Sytron, NEMO ...) utilisées. L'estimation est faite en utilisant un modèle de transfert radiatif pour calculer l'énergie par bande spectrale, visible et très proche infrarouge, du rayonnement solaire incident, en prenant en compte les incertitudes sur la courbe de réponse de l'appareil photo. Le résultat obtenu est une carte d'albédo (rapport de l'énergie solaire réfléchie sur l'énergie incident) qui est directement comparable aux sorties de la modélisation.

Dans le même temps le laser scan terrestre a montré son aptitude à restituer la répartition spatiale des hauteurs de neige y compris sur des pentes raides [Prokop, 2008] et c'est cette technologie qui est utilisée lors des campagnes de mesures 2010-2011 et 2011-2012.

III.2. Vers une meilleure connaissance des processus physiques...

Les premiers résultats obtenus grâce à ce renforcement d'instrumentation ont montré que [Naaïm-Bouvet F., 2008], [Naaïm-Bouvet F., 2010], [Naaïm-Bouvet F., 2011] :

— La proportionnalité de la rugosité aérodynamique avec la vitesse de frottement semble confirmée (figure 9) avec un coefficient de proportionnalité dépendant de l'évènement. Cependant la faible valeur du coefficient de corrélation et la grande variabilité des résultats reste source d'interrogation.

— Les valeurs de $\sigma_s U_F$ sont bien approximées par la relation semi-empirique ($\sigma_s U_F = 0,387 u_* + 0,07$) obtenue à partir d'une ré-analyse de données acquises en Antarctique [Naaïm-Bouvet F., 1996] (figure 10).

— L'utilisation de la formulation de la concentration dans la couche de saltation proposée par Pomeroy couplée à une modélisation de la couche de diffusion turbulente (équation 1) peut conduire dans la configuration du Col du Lac Blanc à une surestimation des flux de neige transportée (figure 11) ;

$$C(z) = \frac{2^* 0.68}{2.8^* 1.6} \frac{\rho}{u_*} \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2} \right) \left(\frac{z}{0.08436 u_*^{1.27}} \right)^{-\frac{\sigma_s U_F}{k U_*}} \quad (1)$$

La distribution granulométrique des particules transportée s'ajuste généralement bien avec une loi gamma (figure 12), que ce soit pour des flux « instantanés » (échantillonnage

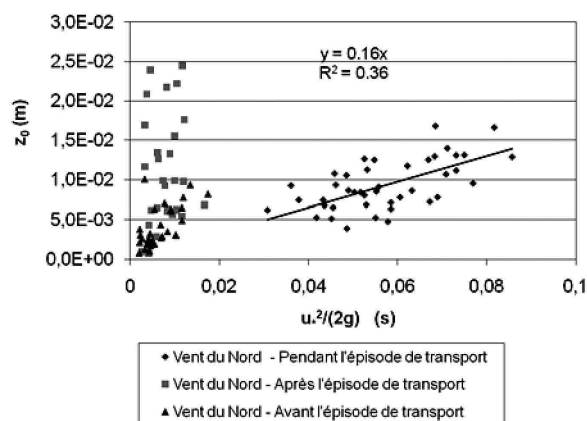


Figure 9 : Exemple de relation liant la rugosité aérodynamique z_0 et la vitesse de frottement u_* .

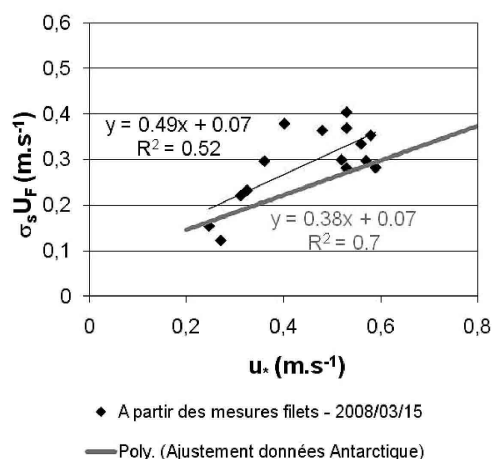


Figure 10 : Evolution de $\sigma_s U_F$ en fonction de la vitesse de frottement u_* , comparée à l'ajustement obtenu en Antarctique.

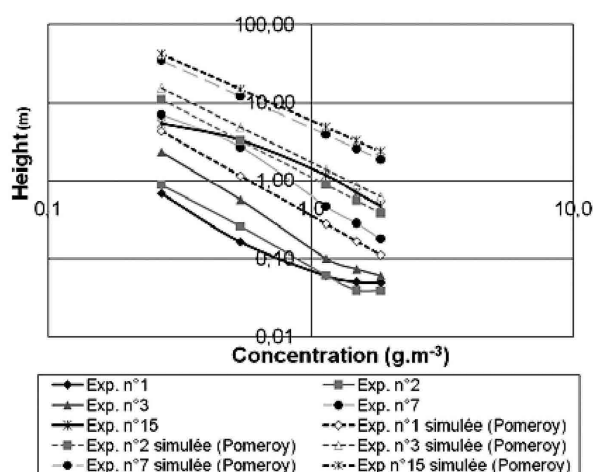


Figure 11 : Profils de concentration de neige soufflée obtenus le 04/03/2008 avec des pièges à neige (lignes continues) et simulés à l'aide de l'équation 1 (lignes discontinues).

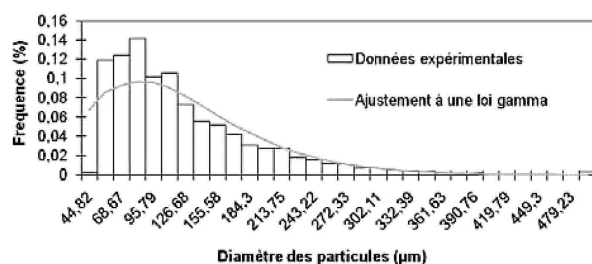


Figure 12 : Exemple de distribution granulométrique de particules de neige soufflée.

d'une seconde) que pour des flux moyens (10 minutes). L'étude des coefficients de rafales de transport sur une seconde montrent que leur valeur est supérieure à la valeur seuil attendue (ce qui peut cependant être lié à une sensibilité de l'anémomètre supérieure à la seconde) mais que la valeur de ce coefficient diminue avec la durée de la rafale.

III.3.pour une meilleure modélisation

Grâce aux séries de mesures hebdomadaires effectuées au Col du Lac Blanc et l'examen minutieux a posteriori des

événements de transport, une généralisation 3D du modèle Sytron 1 a été développée (Sytron 2 et 3) [Durand Y., 2004], [Durand Y., 2005]. Elle permet de simuler de manière réaliste les transferts horizontaux et verticaux de masse de neige sur un domaine montagneux restreint (maille de 50 m) inclus dans un massif où les résultats de la chaîne SCM sont disponibles. La figure 13 illustre l'impact de ces processus sur la hauteur de neige totale d'un domaine limité centré autour du Lac Blanc après une simulation numérique (18 heures) d'un épisode de transport avec Sytron 3 en montrant bien les relations complexes qui relient le champ de vent, le relief et le couvert neigeux. Les flèches représentent le champ de vent modélisé qui est issu d'une modélisation séparée mais à la même échelle et qui est représentatif d'un flux de Sud. Les couleurs vertes et bleues signalent les zones d'accumulation de neige au sol localisées souvent sous le vent du relief (tracé en trait gras) tandis que les teintes rouges représentent les zones d'ablation. L'amplitude maximale des différences modélisées peut dans ce cas atteindre 7 cm pour des valeurs de champs de vent de 10 à 15 m/s. Le développement et la poursuite de cette série de modèles sont actuellement envisagés dans le contexte d'un couplage complet et interactif entre un modèle météorologique complexe et une modélisation fine des processus physiques [Vionnet V., 2011].

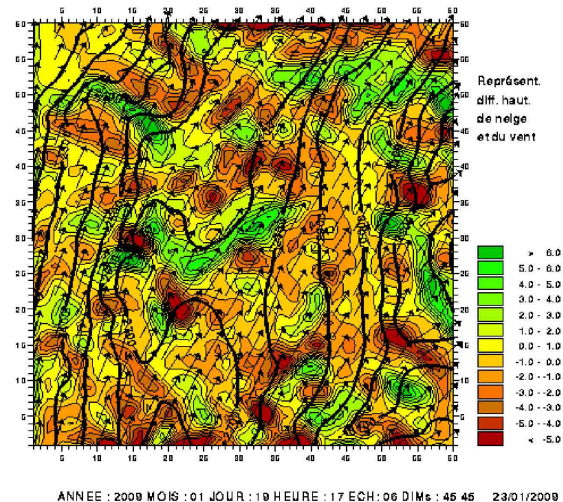


Figure 13 : Action du transport de neige par le vent modélisée sur le site du Lac Blanc. On représente sur le graphique la différence de hauteur de neige le 19/01/2009 entre 12 et 18h et le vent en fin d'épisode.

IV. CONCLUSIONS

Nous avons vu que le transport de neige par le vent est un phénomène complexe sur différentes échelles spatiales et est représentatif de l'interaction mutuelle entre l'atmosphère et le couvert neigeux. La connaissance fine de ces deux milieux est extrêmement difficile à acquérir et le nombre de paramètres très élevé. S'attaquer à ce problème, pour les raisons évoquées précédemment, nécessite donc une synergie des moyens, des équipes, des sites, des spécialités et des expertises. On retrouve tout cela sur le site du Lac Blanc qui a permis d'observer, de modéliser, de valider, d'observer de nouveau et différemment pour affiner les modélisations précédentes afin de continuer à améliorer notre connaissance

des processus et le moyens de les représenter et d'en réduire les risques sous-jacents.

Le site du Col du Lac Blanc fait désormais partie d'un atelier d'observations labellisé par l'OSUG (CENACLAM : Climatologie des Echanges Neige Atmosphère, de la Couche Limite Atmosphérique et du Manteau neigeux), dont les données seront prochainement diffusées à l'adresse <http://portail.osug.fr/CENACLAM.html>

V. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société d'Aménagement Touristique de l'Alpe d'Huez pour son soutien logistique constant ainsi que la Région Rhône-Alpes et le Pôle Alpin d'études et de recherche pour la Prévention des Risques Naturels pour leur soutien financier. Ils remercient également leurs collègues Robert Bolognesi, Thierry Castelle, Javier Corripio, François-Xavier Cierco, Laurent Merindol, Jean-Luc Michaux, Frédéric Ousset, Jean-Michel Panel, Fabien Perault, Martine Roussel, et Xavier Ravanat pour leur participation active aux expérimentations menées au Col du Lac Blanc depuis 20 ans.

VI. RÉFÉRENCES

- Corripio J.G., Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L., Lecorps D., Pugliese P. (2004) — Land-based remote sensing of snow for the validation of a snow transport model. *Cold Regions Science and Technology*. **39** 93-104
- Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L., Corripio J.G. (2004) — 2D numerical modelling of surface wind velocity and associated snowdrift effects over complex mountainous topography. *Annals of Glaciology*. **38** 59-71
- Bellot H., Naaïm-Bouvet F. (2010) — *Les capteurs de transport de neige par le vent au banc d'essai*. *Revue SET*. **2** 66-77
- Bellot H., Trouvilliez A., Naaïm-Bouvet F., Genthon C., Gallée H. (2011) — Present weather sensors tests for measuring drifting snow. *Annals of Glaciology*. **58(52)** 176-184
- Cierco F-X., Naaïm-Bouvet F., Bellot H. (2007) — Acoustic sensors for snowdrift measurements: How should they be used for research purposes? *Cold Regions Science and Technology*. **49** 74-89
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. (1999) — A computer based system simulating snowpack structures as a tool for regional Avalanche forecast. *Journal of Glaciology*. **45 (151)** 469-485
- Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L. (2001) — Numerical Experiments of Wind Transport over a Mountainous Instrumented Site : I Regional scale. *Annals of Glaciology*. **32** 187-195
- Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L., Corripio J.G. (2005) — Improvement of a numerical snow drift model and field validation. *Cold Regions Science and Technology*. **43(1-2)** 93-103
- Gallée H., Guyomarc'h G., Brun E. (2001) — Impact of snowdrift on the Antarctic ice sheet surface mass balance : possible sensitivity to snow surface properties. *Boundary-Layer Meteorology*. **99** 1-19
- Guyomarc'h G., Durand Y. (2010) — Key parameters for local drifting snow events. *Proceedings of international snow science workshop, Squaw Valley (CA - USA)*
- Guyomarc'h G., Mérindol L. (1998) — Validation of an application for forecasting blowing snow. *Annals of Glaciology*. **26** 138-143
- Mérindol L., Durand Y., Guyomarc'h G. (2000) — Simulation of Snowdrift over Complex Terrain. *ICAM 2000, Innsbruck*
- Michaux J.L., Naaïm-Bouvet F., Naaïm M. (2001) — Drifting-snow studies over an instrumented mountainous site : II. Measurements and numerical model at small scale. *Annals of Glaciology*. **32** 175-181
- Naaïm M., Naaïm-Bouvet F., Martinez H. (1998) — Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models. *Annals of Glaciology*. **26** 191-196
- Naaïm-Bouvet F., Naaïm M., Martinez H. (1996) — Profils de concentration de la neige soufflée : Théorie, résolution numérique et validation expérimentale in situ. *La Houille Blanche*. **5** 53-57
- Naaïm-Bouvet F., Durand Y., Michaux J-L., Guyomarc'h G., Naaïm M., Merindol L. (2000) — Numerical experiments of wind transport over a mountainous instrumented site at small, medium and large scales. *Proceedings of international snow science workshop, October 1st-6th, 2000, Big Sky, Montana*. 302-308
- Naaïm-Bouvet F., Bellot H., Cierco F-X., Naaïm M. (2008) — Input for a blowing snow numerical model : in situ measurements are still needed. *International Snow Science Workshop, Whistler, BC, Canada*
- Naaïm-Bouvet F., Bellot H., Naaïm M. (2010) — Back analysis of drifting-snow measurements over an instrumented mountainous site. *Annals of Glaciology*. **51(54)** 207-217
- Naaïm-Bouvet F., Naaïm M., Bellot H., Nishimura K. (2011) — Wind and drifting snow gust factor in an Alpine context. *Annals of Glaciology*. **58(52)** 223-230
- Prokop, A. (2008) — Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. *Cold Regions Science and Technology*. **54(3)** 155-163
- Vionnet V., Martin E., Masson V., Brun E., Durand Y., Guyomarc'h G., Lac C. (2011) — Simulations of snow-drift events in alpine terrain using a meso-scale atmospheric model. *IUGG 2011, Melbourne 2011/6/27*